

[19] 中华人民共和国国家知识产权局

[51] Int. Cl.  
G02B 6/02 (2006.01)



## [12] 发明专利申请公开说明书

[21] 申请号 200480007276.7

[43] 公开日 2006 年 4 月 19 日

[11] 公开号 CN 1761896A

[22] 申请日 2004.2.24

[21] 申请号 200480007276.7

[30] 优先权

[32] 2003.3.20 [33] US [31] 10/392,652

[86] 国际申请 PCT/US2004/005519 2004.2.24

[87] 国际公布 WO2004/095097 英 2004.11.4

[85] 进入国家阶段日期 2005.9.19

[71] 申请人 康宁股份有限公司

地址 美国纽约州

[72] 发明人 陈欣 李明军 J·C·迈耶  
O·帕尔玛

[74] 专利代理机构 上海专利商标事务所有限公司  
代理人 钱慰民

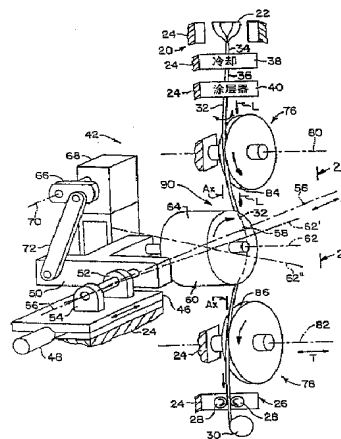
权利要求书 2 页 说明书 12 页 附图 6 页

### [54] 发明名称

制造具有低偏振模色散的旋制光纤的方法

### [57] 摘要

一种光纤以及制造这种光纤的方法，其中该光纤展现约大于 5 米的拍频长度，并且该光纤旋转以在所述光纤的螺旋态中提供偏振模色散，其值小于  $0.03\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。该螺旋最好在顺时针和逆时针方向之间交替，该交替具有至少 10 米的重复距离。



- 1.一种单模光纤,所述单模光纤展现出大于 5 米的拍频长度、具有一纵轴以及在所述光纤上外加的螺旋,其特征在于,外加到所述光纤上的螺旋的至少一部分交替地为顺时针和逆时针方向,螺旋重复距离至少是 10 米,所述螺旋重复距离足够赋予所述光纤小于  $0.03 \text{ ps/km}^{1/2}$  的偏振模色散。
- 2.如权利要求 1 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤展现出大于约 20 米的拍频长度。
- 3.如权利要求 1 所述的光纤,其特征在于,所述螺旋重复距离大于或等于 20 米。
- 4.如权利要求 1 所述的光纤,其特征在于,所述螺旋重复距离大于 30 米。
- 5.如权利要求 1 所述的光纤,其特征在于,在所述光纤上外加的螺旋包括正弦螺旋函数。
- 6.如权利要求 1 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤展现出大于 10 米的拍频长度,并且从在所述光纤上外加的螺旋中得到的 PMD 小于  $0.02 \text{ ps/km}^{1/2}$ 。
- 7.如权利要求 1 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤展现出大于 10 米的拍频长度,并且从在所述光纤上外加的螺旋中得到的 PMD 小于  $0.01 \text{ ps/km}^{1/2}$ 。
- 8.如权利要求 1 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤包括具有不止一个纤芯部分的分段的纤芯剖面。
- 9.如权利要求 8 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤包括具有如下特征的纤芯剖面,其中心部分折射率为 $\Delta 1$ ,围绕所述第一部分的环形部分折射率为 $\Delta 2$ ,围绕所述第一环形部分的第二环形部分折射率为 $\Delta 3$ ,其中 $\Delta 1 > \Delta 3 > \Delta 2$ 。
- 10.如权利要求 1 所述的单模光纤,其特征在于,所述光纤包括步长指数或圆整步长指数剖面以及大于 30 米的拍频长度。
- 11.如权利要求 9 所述的光纤,其特征在于,所述螺旋光纤的 PMD 小于  $0.02 \text{ ps/km}^{1/2}$ 。
- 12.一种制造光纤的方法,其特征在于,包括:  
加热光纤预制棒的至少一部分;以及  
从所述加热的预制棒抽取光纤,使得通过把转矩施加到所述光纤来将螺旋

外加到所述光纤上，所述转矩使所述光纤绕所述光纤的纵轴旋转，从而随着所述光纤从所述预制棒中抽取，所述螺旋被外加到所述光纤上，其中所述光纤的拍频长度大于约 5 米并且外加到所述光纤上的螺旋的至少一部分交替地为顺时针和逆时针方向，螺旋重复距离至少 10 米。

- 5        13.如权利要求 12 所述的方法，其特征在于，所述螺旋重复距离大于或等于 20 米。

- 14.如权利要求 12 所述的方法，其特征在于，还包括在所述加热步骤之前，通过一过程来形成所述光纤预制棒，所述过程包括沉积多层二氧化硅粉尘使得所述预制棒的纤芯区域包括中心区域、围绕所述中心区域的第一环形区域以及  
10    围绕所述第一环形区域的第二环形区域，其中这些区域的折射率分别为 $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$ 和 $\Delta 3$  并且 $\Delta 1 > \Delta 3 > \Delta 2$ 。

15.如权利要求 14 所述的方法，其特征在于，使用一过程来沉积所述沉积层，在所述过程中将二氧化硅基粉尘沉积到一圆柱衬底的外侧。

- 16.如权利要求 15 所述的方法，其特征在于，所述圆柱衬底中的至少一个  
15    是玻璃纤芯棒。

17.如权利要求 12 所述的方法，其特征在于，外加到所述光纤上的螺旋包括正弦形。

- 18.如权利要求 12 所述的方法，其特征在于，外加到所述光纤上的螺旋在以所述顺时针方向赋予的峰值旋转速率和以所述逆时针方向赋予的峰值旋转  
20    速率之间是对称的。

## 制造具有低偏振模色散的旋制光纤的方法

5

技术领域

本发明涉及制造光纤的方法，根据此方法，光纤从预制棒的熔融末端抽取，并随后经过转动力矩，由此使光纤的一部分绕其纵轴扭曲并自然地具有螺旋。本发明尤其涉及这种类型的具有低偏振模式色散的光纤。

10

发明背景

在光纤中穿行的光具有两个偏振模式。对于在几何形状、内应力以及外加应力等诸多方面都具有极佳的圆对称性的光纤而言，在波长处或在被视为“单模”的波长范围中的操作实际上支持两个正交偏振模，其中两个偏振模是简并的，以相同的群速度传播，在光纤中前进相同的距离之后无时间延迟。然而，在实践中，光纤并不是完全的圆对称。例如，诸如几何和形状变形的缺陷以及应力非对称性破坏了两个模式的简并度。参见，例如 Rashleigh, S.C., Journal of Lightwave Technology, LT-1:312-331, 1983。结果，两个偏振模以不同的传播常数  $\beta_1$  和  $\beta_2$  传播。传播常数之间的差异被称为双折射  $\delta\beta$ ，双折射的大小由两个正交模式的传播常数之差给出：

$$\delta\beta = \beta_1 - \beta_2 \quad (1)$$

双折射使在光纤中传播的光的偏振态沿光纤的长度周期性地演变。偏振回到其初始态的所需距离为光纤拍频长度  $L_B$ ，它与光纤双折射成反比。具体地，拍频长度  $L_B$  由下式给出：

25

$$L_B = \frac{2\pi}{\delta\beta} \quad (2)$$

因此，双折射较大的光纤具有较短的拍频长度，反之亦然。商用光纤呈现出很多种拍频长度，因为这种光纤的几何与应力非对称性沿光纤的长度以及在

不同光纤之间变化。实践中所观察到的典型拍频长度小至 2-3 毫米（双折射较大的光纤）大至 10-100 米（双折射较小的光纤）。

除了使光纤中穿行的光的偏振态周期性地变化之外，双折射的存在还意味着两个偏振模以不同的群速度前进，随着双折射的增加这种速度差异也增加。

- 5 两个偏振模之间的微分时间延迟称为偏振模色散或 PMD。PMD 使信号失真，并因此对高比特速率系统和模拟通信系统非常有害。对于没有微扰（即外部强加的微扰）的均匀线性双折射光纤，光纤的 PMD 随光纤长度的增加而线性增加。但是，在更长的长度中，由于外部强加的扰动，随机的模式耦合不可避免地被引入到光纤中，并且在统计上 PMD 沿光纤的增加正比于光纤长度的平方根。
- 10

一种已知的抗击 PMD 的方法是当光纤从预制棒抽取时故意地螺旋温热的纤维，所以当纤维冷却时机械螺旋就“冻结”到纤维中了。纤维中双折射轴的最后螺旋产生了载波信号的正交偏振模之间持续的模式耦合，因此抑制了两个模式之间显著的相位迟延的积累，并最终使纤维 PMD 显著减小。

- 15 在专利号为 6,324,872 的美国专利中已知在其首段中详述了一种方法，其中使被抽取纤维通过螺旋轴可倾斜的滚筒上，所以可使滑轮绕垂直于其螺旋轴的一个轴来回摇摆。滚筒的摇摆动作在纤维中沿其长度的相当大的部分产生了扭曲。特别地，以这种方式扭曲的温热纤维的部分会随着其组成材料后来冷却而变为具有永久扭曲（螺旋）。

- 20 所引用的文档规定赋予纤维的旋转在理想情形下具有非恒定的空间频率。这可通过以非周期的方式来回倾侧滑轮来实现。这样，所述方法以实现小于  $0.5\text{ps/km}^{1/2}$  的 PMD 为目标。

- 但是，用于旋转纤维以减小 PMD 的已知方法具有一些不足。例如，目前制造的光纤的质量正在日益改进。结果，现在甚至非螺旋的光纤都有能力展现出小于  $0.1\text{ps/km}^{1/2}$  的 PMD。不幸的是，要想把在目前所制造的某些单模纤维中存在的已经较低的 PMD 水平减小到甚至更低的水平，现有技术的旋转方法并不是十分成功的。
- 25

## 发明内容

本发明涉及一种新颖且方便的制造光纤的方法，它可用于产生具有较低 PMD 的光纤，例如在小于  $0.05\text{ps}/\text{km}^{1/2}$  的量级上，更佳地是小于  $0.03\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ，甚至更佳地是小于  $0.02\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ ，以及最佳地是小于  $0.01\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。更具体地，本发明的方法包括提供常规的光纤预制棒，把预制棒的至少一部分加热到常规

5 的抽取温度，并且以把螺旋外加到光纤上的方式从加热的预制棒抽取出光纤。换句话说，把转矩应用到光纤从而使光纤绕其纵轴扭曲，结果，在加热区中光纤材料扭转变形。此处，如果使加热区的光纤材料扭转变形并把此变形冻结到光纤中，使得光纤展现出永久的“螺旋”，即永久的扭转变形，则螺旋被“印”在光纤上。

10 申请人已发现，对于 PMD 小于  $0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$  处于非螺旋态中的单模光纤，需要旋转该光纤使得扭曲的周期或螺旋重复距离，即来回改变旋转方向所需的距离，大于 10 米，更佳地大于 20 米，以及最佳地大于 30 米。例如，对于步长指数单模光纤（例如，其色散斜率约  $0.06\text{ps}/\text{nm}^2/\text{km}$ ，在 1550nm 处色散值从大约 16 到  $20\text{ps}/\text{nm}/\text{km}$ ），这种光纤展现出的拍频长度现在一般都在大于 30 米

15 的量级。

尽管在本发明的一些较佳的实施例中，峰值光纤旋转速率大于 1.5 转/米且更佳地约在 1.2 和 4 转/米之间，但是本发明并不限于这样的光纤旋转速率，大于 4 转/米或小于 1.2 转/米的旋转速率也是可以成功使用的。

非螺旋光纤中的 PMD 水平与该光纤中的拍频长度相关，并且一般说来，

20 对于具有约 10 米的典型模式耦合长度的光纤，小至大约  $0.1\text{ps}/\text{km}^{1/2}$  的 PMD 等于大约 5 米的拍频长度。结果，本发明的方法尤其可应用于拍频长度大于 5 米的单模光纤。同样，本发明的方法可应用于拍频长度大于 10 米甚至大于 20 米或 50 米的单模光纤。同样，本发明的方法可应用于 PMD 小于  $0.05\text{ps}/\text{km}^{1/2}$  的非螺旋态单模光纤。

25 利用本发明的方法，可实现许多超越现有技术的优势。本发明在用于把较低的 PMD 赋予工作波段为 1300 到 1625（最好是在 1550nm 附近）的单模光纤时尤其有价值。结果，本发明也在新型低 PMD 单模光纤或包括这种光纤的物件（例如，光纤通信系统）中得到实施。例如，之前没听过的低值 PMD 可在拍频长度较长（大于 5 米，更佳地大于 10 米）的单模光纤上常规且稳定地得

到实现。例如，在螺旋态光纤上低至 0.05 的 PMD，更佳地小于 0.03、甚至更佳地小于 0.02 以及最佳地小于  $0.01 \text{ ps/km}^{1/2}$  的 PMD 可以通过使用此处所揭示的方法在这种光纤上得到实现。

5 本发明另外的特征和优势会在下面的详细描述中加以阐明，并且对本领域的技术人员而言从那些描述中这些特征和优势会部分地显得清晰，或者通过如此处所描述地实践本发明来认识这些特征和优势，此处的描述包括下面的详细描述、权利要求书以及附图。

应该理解，前面的一般描述和后面的详细描述呈现了本发明的诸多实施例，并且旨在为理解如权利要求书所提到的本发明的本性和特征提供总的看法  
10 和框架。附图被包括在此以提供对本发明的进一步理解，并且附图包含在并组成说明书的一部分。附图示出了本发明的各种实施例，与说明书一起用于解释本发明的原理和操作。

#### 附图说明

15 图 1 示出了在拍频长度约为 1 米旋转幅度为 2.5 转/米的光纤上不同的旋转周期具有的 PMD 减小因子的效果。

图 2 示出了在拍频长度约为 10 米旋转幅度为 2.5 转/米的光纤上不同的旋转周期具有的 PMD 减小因子的效果。

20 图 3 示出了作为距离的函数的旋转速率，该距离针对旋转幅度为 3.0 转/米以及旋转周期为 20.0 米的正弦曲线螺旋轮廓。

图 4 是可用来实施本发明的方法的光纤旋转装置的示图。

图 5 示出了作为旋转幅度的函数的 PMD 减小因子，这是针对 20 米的固定旋转周期，针对拍频长度为 20.0 米的光纤。

25 图 6 示出了旋转幅度作为光纤拍频长度的函数的 PMD 减小因子，这是针对 5 米、10 米、20 米和 50 米的旋转周期，2.0 转/米的固定旋转幅度。

图 7 示出了旋转幅度作为距离的函数的旋转速率，这是针对旋转幅度为 3.0 转/米，旋转周期为 20.0 米的梯形螺旋轮廓。

图 8 示出了旋转幅度作为光纤拍频长度的 PMD 减小因子，这是针对旋转周期为 5 米、10 米、20 米、50 米以及旋转幅度大小为 3.0 转/米的梯形螺旋轮

廓。

图 9 示出了 NZDSF 光纤的折射率轮廓。

### 具体实施方式

- 5 为描述 PMD 减小，我们定义称为 PMD 减小因子的参数，该参数是螺旋光纤的 PMD ( $\tau$ ) 与非螺旋态的相同光纤的 PMD ( $\tau_0$ ) 的比值：PMDRF =  $\tau / \tau_0$ 。例如，如果 PMDRF 是 1.0，则在光纤 PMD 中没有改进，而 PMDRF 为 0.2 则意味着 PMD 已改进了一个因子 5。

- 申请人已发现，PMD 减小性能与光纤拍频长度以及使用旋转技术的光纤的类型强烈相关。当使用此处所揭示的长周期旋转技术时，具有较长拍频长度的光纤的 PMD 可显著减小。然而，当把同样的技术应用于具有较短拍频长度的光纤（例如，拍频长度为 1 米的光纤）时，PMD 减小可能非常不明显。图 1 和图 2 示出了在两个光纤上旋转周期的效果，其一拍频长度约为 1 米，另一个拍频长度约为 10 米。在图 1 和图 2 中，旋转幅度都是 2.5 转/米。尽管甚至在 15 年前拍频长度约为 1 米的光纤一般都被视为品质良好，但是目前的制造方法已能常规且稳定地实现拍频长度大于 10 米或更大的光纤。图 1 和图 2 令人惊讶地示出了对于拍频长度较短的光纤长周期旋转技术并未实现相同的 PMD 机械量。相反，长周期旋转技术对高拍频长度光纤的 PMD 有极其有益的效果，事实上对拍频长度较小的光纤（例如，小于 5 米）效果就很不明显。图 1 和图 2 20 示出了对于拍频长度不同的两个光纤 PMD 减小因子对旋转周期的关系图。图 1 和图 2 都示出了使用长周期正弦螺旋（率）轮廓所获得的结果，形式如下：

$$\alpha(z) = \alpha_0 \cdot \cos\left(\frac{2\pi z}{\Lambda}\right) \quad (6)$$

- 25 其中  $\alpha_0$  是旋转幅度，单位是转/米， $\Lambda$  是旋转周期，单位是米。图 3 示出了周期为 20 米的正弦螺旋轮廓。如图 1 所示，对于拍频长度较低的光纤，增加旋转周期实际上对螺旋以减小光纤 PMD 的能力具有负面的效果。在另一方面，如图 2 所示，拍频长度约为 10 米的光纤清楚地显示出在较长的旋转周期处改进的 PMD 减小。结果，尽管在光纤制造过程中所用的大多数常规旋转技术通



常已包括小旋转周期（例如，小于 5 米），但是发明者的发明使用较长周期以有效地减小拍频长度较长的光纤的 PMD。

任何能够在光纤拉丝过程中旋转该光纤并且还能够改变旋转的频率和/或振幅的装置都可用来实施本发明的方法。图 4 示出了能够产生此处所揭示的旋  
5 转功能以赋予光纤所期望的螺旋的这样一种装置。参照图 4，调整熔炉 20 以夹住通常在光纤拉丝过程中所使用的类型的预制棒 22。熔炉 20 安装到支架 24 上。支架 24 定义了拉丝系统固定的标准架，例如，它可以是在其中实施光纤拉丝操作的组合架。在熔炉 20 的下方，提供具有一对相反的拉丝滚筒 28 的牵引或拉伸台 26。牵引台 26 包括诸如电动机械的驱动系统这样的常规元件（未示出），  
10 用于使滚筒 28 绕其轴转动以便轻拉咬合在滚筒之间的光纤。同时提供收紧卷轴 30。收紧卷轴也由常规装置（未示出）驱动，绕相对于支架 24 固定的轴旋转以便把光纤从牵引台 26 缠绕到收紧卷轴上。安排熔炉 20 使预制棒 22 的至少一部分维持在柔软的、实际上熔融的状态中。安排牵引台 26 从预制棒 22 的熔融部分拉出光纤 32 使得光纤通过实际上已预定的路径。

15 在邻近该路径的上游末端的熔化区 34 中，光纤实际上是熔融的。然而，随着光纤沿该路径向下游末端移动，光纤被冷却并凝固，使得当光纤到达和熔炉 20 相比位于相当下游的一个点 36 时它已充分冷却至固态。从点 36 延伸到该路径的下游末端的路径区域在此处称为该路径的“固态区域”。冷却设备 38 可在熔化区和固态区之间提供。令人期望的是，冷却设备提供非接触式冷却，  
20 使得在光纤冷却时没有固态物体接触到光纤的表面。

在固态区 36 中，涂层设备 40 也安装到支架 24 上。调整涂层设备以把聚合物涂层涂在光纤的外面。涂层设备最好也是非接触式设备。即，光纤穿过涂层器 40 而不用接触或咬合任何其它固体。例如，在专利号为 4,792,347 的美国专利中揭示了合适的非接触式涂层器。前述装置中的元件可以是在光纤拉丝技术  
25 中通常使用的常规设计。该装置可进一步包括与路径 32 的下游末端相邻的附加的引导滚筒，用于使光纤转向并因此使该路径偏离直线，还用于进一步约束在该路径中的光纤。其它诸如质量检测装置等的常规元件也可被包括进去。

螺旋构成装置包括可滑动地安装到支架 24 上的可调式托架 4，用于在横穿路径 32 的纵向的交叉路径方向 X 中的移动。提供微米调节设备 48，用于在交

叉路径方向中移动托架，并且用于一旦相同的托架已调节到相对于支架 24 的期望位置时就把该托架锁定在适当的位置。通过机械轴 52 和轴承 54 把夹具 50 安装到托架 46 上，使得夹具 50 相对于托架 46 并因此相对于支架 24 可绕摇摆轴 56 旋转，摇摆轴 56 在交叉路径方向 X 上延伸并与路径 32 相交在交点 58 处。

- 5       螺旋赋予组件 42 进一步包括安装在夹具 50 上用于绕第一元件轴 62 旋转的圆柱形的第一滚筒 60。滚筒 60 具有包围第一元件轴 62 且与之共轴的圆周表面 64。马达 68 的支架安装在托架 46 上。在马达 68 的机械轴上支持着曲柄 66，所以马达能使曲柄 66 绕平行于摇摆轴 56 的一轴 70 转动。连接杆 72 的一端绕枢轴旋转地连接到曲柄 66，连接点远离其轴 70。连接杆 72 的另一端绕枢轴旋转地连接到夹具 50，连接点远离其摇摆轴 56。从而，曲柄 66 绕曲柄轴 70 的旋转会驱动夹具 50 绕摇摆轴 56 在两个极限位置之间作摇摆运动，在第一极限位置，滚筒轴或第一元件轴 62 倾斜到图 1 中 62' 处以虚线表示的位置，在第二极限位置，滚筒轴或第一元件轴 62 在相反的方向上倾斜到图 1 中 62'' 处以虚线表示的位置。如图 2 中清晰所见，极限位置 62' 和 62'' 位于从标定位置 62 起相等但相反的极限倾斜角 E1 和 E2 处，在标定位置 62 处滚筒轴或第一元件轴垂直于路径 32 的纵向。然而，在包括这些极限位置在内的所有的滚筒位置中，滚筒轴 62 一般保持横穿该路径的纵向。令人期望的是，每个极限角 E 都在从标定位置起约 2 度到 10 度之间。如下面进一步的讨论，所期望的角度取决于要赋予光纤的旋转量。通过调节曲柄 66 的尺寸，特别是通过调节连接杆 72 的铰链接合与轴 70 之间的间距，可调节角度 E。马达 68 的旋转速度决定夹具 50 和第一元件 60 会在两个极限位置之间摇摆的速率。马达 68 可以是可调速设备，比如由常规类型的数字控制系统来驱动的分档器马达、由可调电压源驱动的 DC 马达、由可调气体源驱动的空气马达或任何其它常规的可变速的马达。或者，马达 68 可以是速度固定的马达。在专利号为 6,324,872 的美国专利中进一步描述  
15  
20  
25 了此类旋转设备，该专利的说明书引用在此作为参考。

在本发明的实践中可使用不同于图 4 所示的装置。参看，例如专利号为 4,509,968 的美国专利，该专利描述了用于当光纤正在形成时使光纤绕其轴旋转的装置，也可参看专利号为 5,298,047、5,897,680、5,704,960 以及 5,943,466 的美国专利。概括地讲，旋转装置通常会包括用于把旋转力施加到光纤上的光纤

接触装置，例如滚筒；以及用于以作为时间的函数的非正弦空间模式来移动光纤接触装置的驱动装置，例如计算机控制驱动马达以及相关联的用于定义光纤接触装置的移动的机械连接。

对于本领域技术人员，从下面的描述中会看到，用于实施本发明的方法的另外的机械装置是明显的，例如用于预制棒的正弦或非正弦螺旋的机械装置，当这种预制棒单独使用时或与把旋转力施加到光纤上相结合。

此处所使用的旋转周期较佳地至少是 10 米，更佳地至少是 20 米，甚至更佳地至少是 50 米，尽管发明者认为旋转可以发生所对应周期是没有上限的，从而旋转周期可以长达 100 米或更长。这在图 2 中是很明显的，图中绘出了 PMD 减小因子与旋转周期的关系。尽管 PMD 减小因子敏感地取决于旋转周期的值，但是整体的趋势是当旋转周期增大时 PMD 减小因子变小。PMD 减小因子的局部最大值提供了 PMD 减小性能的最差的情形判断。在图 2 中发现，甚至对于 2.5 转/米的旋转幅度，长周期旋转所对应的 PMD 值可由因子 10 左右来改进，当旋转周期大于 20.0 米时改进会更好。

使用长周期旋转的 PMD 减小同样对典型的过程变化不敏感。与变化有关的典型的过程包括在光纤拉丝过程期间旋转幅度的变化以及光纤拍频长度沿该光纤的某些波动。因为光纤旋转是由在运行的光纤和摇晃的轮子之间的摩擦力所强加的，所以旋转量和作为结果的旋转幅度不可避免地遭受一些波动。这种变化有时可大至 $\pm 0.5$  转/米。图 5 示出了在旋转周期固定为 20.0 米时作为旋转幅度的函数的 PMD 减小因子，并且示出了在较长的旋转周期处，对于很多的旋转幅度 PMD 减小因子都较低，尤其是在大于 1.5 转/米的旋转幅度处。对于 20 米的旋转周期，当旋转幅度大于 1.5 转/米时可实现优于因子 10 的光纤 PMD 的改进。另一个可影响到 PMD 减小的过程变化是光纤拍频长度波动。图 6 示出了旋转幅度作为拍频长度的函数的 PMD 减小，这是针对不同旋转周期且旋转幅度固定（2 转/米）的情形，并且示出了 PMD 减小是依赖于拍频长度的。对于 PMD 减小，只要 PMD 减小因子足够低，则拍频长度依赖性就不是问题。结果，使用此处所揭示的长周期旋转技术可实现显著的 PMD 减小，甚至对于光纤拍频长度大于 5 米的情形也如此。

为赋予长周期螺旋此处所使用的长周期螺旋轮廓可以是任何周期性的形

状。为赋予长周期螺旋所使用的螺旋轮廓最好具有周期性的形状，其中首先顺时针旋转光纤，然后逆时针。周期性的螺旋轮廓最好也是对称的螺旋轮廓，其中在逆时针方向中最大旋转率的大小至少在相当大的程度上等于当在顺时针方向中旋转时光纤的旋转率的大小。周期性的螺旋轮廓的形状可以是任何形状，包括但不限于正弦的、三角的、梯形的或其它具有相似或更长的螺旋周期的周期性螺旋函数。此处所使用的最佳的螺旋轮廓是正弦螺旋轮廓，在顺时针和逆时针方向的旋转率的大小中该轮廓是对称的。然而，可以使用其它螺旋轮廓，同时对其它螺旋轮廓 PMD 减小性能应该是相似的。图 7 示出了梯形螺旋轮廓的典型形式。图 8 示出了作为光纤拍频长度的函数的 PMD 减小因子，这是针对对于若干旋转周期在旋转幅度固定为 3.0 转/米的情形，并且示出了对于比 10 米长的旋转周期可实现良好的 PMD 减小性能。

如上所述，此处所揭示的旋转方法对于拍频长度较长的光纤尤其有优势。一种制造此类拍频长度较长的光纤的较佳的制造方法是通过外部气相沉积（OVD）技术。在外部气相沉积过程中，纤芯层被沉积到圆柱形的衬底上。中心纤芯区域通常首先被沉积到饵棒或心轴上，当粉尘已构成一足够的厚度以构成中心纤芯区域时移去饵棒或心轴。然后，这个中心纤芯区域被巩固成固体玻璃体，并且关闭由于移去心轴所留下的中心线状空洞。例如，通过把巩固过的粉尘纤芯预制棒轻拉成直径较小的纤芯棒来关闭该空洞。然后，如果需要任何的附加纤芯部分层，则使用中心纤芯区域纤芯棒作为附加的纤芯部分层的基片。在一较佳的实施例，附加的粉尘层被沉积以构成具有三个或更多纤芯折射率区域的分段的纤芯剖面。在一较佳的实施例，纤芯折射率剖面具有至少三个区域，中心区域折射率为 $\Delta 1$ ，中心区域被折射率为 $\Delta 2$ 的第一环形区域所围绕，以及折射率为 $\Delta 3$ 且围绕第一环形区域的第二环形区域。在每个粉尘区域的沉积之前，最好巩固之前的纤芯区域并将其重拉以构成纤芯棒。这样的过程有助于构成拍频长度较长的光纤，在该过程中在沉积附加的粉尘区域之前先巩固各种纤芯区域并将其重拉以使纤芯棒更窄。此外，因为在初始的粉尘沉积过程中用来构成中心纤芯区域的心轴相对较小，所以在中心纤芯区域中必须关闭的空洞比一些其它沉积过程（例如，MCVD）的情形相对较小。结果，OVD 特别是较佳的技术，用于沉积构成此处所用的光纤预制棒所需的粉尘。然而，本发

明当然并不限于这样的预制棒，并且也可使用其它的沉积方法，比如 MCVD、PCVD，尤其还有 VAD。

### 示例

- 5 通过下面的示例会对本发明作进一步的说明，对于本发明而言这些示例都是示例性的而非限制性的。

#### 示例 1

- LEAF®光纤，一种有效面积较大的非零色散位移单模光纤，是根据常规的光纤拉制过程制造的，其中首先制造光纤预制棒，然后把预制棒加热到可以从中拉出光纤的温度。要 LEAF®光纤展现出拍频长度是很具有代表性的。出于对比目的，除使用多种旋转周期外，在螺旋和非螺旋态中拉制相同的光纤。用来计算 PMD 减小因子的非螺旋和螺旋光纤的双折射特性理想地假定为完全相同，并且这些 NZDSF 光纤的拍频长度在 20 米以上。拉制一段非螺旋光纤，紧接着
- 15 是一段螺旋光纤，并且对相同或不同的旋转条件重复这种模式。可从 Corning 公司购买到的 LEAF 光纤具有大于  $50 \mu\text{m}^2$  的有效面积，更佳地大于  $60 \mu\text{m}^2$ ，以及最佳地大于  $70 \mu\text{m}^2$ 。这种光纤也具有大于约 1340nm 而小于约 1520nm（最佳地是在 1400nm 和 1500nm 之间）的零色散波长。这种光纤也展现出小于  $0.09\text{ps}/\text{km}^2$  的斜率。该光纤使用与图 9 所示相类似的折射率剖面。如图 9 所示，
- 20 NZDSF 光纤的折射率剖面使用三部分纤芯，通过对纤芯区域掺杂不同量的锗来构成该三部分纤芯。具体地，纤芯使用具有  $\Delta 1$  的中心纤芯区域、具有  $\Delta 2$  且围绕第一纤芯区域 100 的第二纤芯区域 102 以及具有  $\Delta 3$  且围绕第二纤芯区域 102 的第三纤芯区域 104。然而，本发明并不限于这些类型的折射率剖面，可以使用很多种折射率剖面，尤其是三部分满足  $\Delta 1 > \Delta 3 > \Delta 2$  的折射率剖面，如
- 25 具有图 8 所示的折射率剖面情形。在某些情形中，可能需要对围绕区域 102 掺杂氟以把折射率降低到低于涂覆层的折射率，涂覆层最好是未掺杂的二氧化硅。如本领域所知，通过使用不同的折射率剖面，色散斜率小于 0.07 甚至更佳地小于 0.06 的光纤可轻松地得以实现，尤其是使用满足  $\Delta 1 > \Delta 3 > \Delta 2$  的三部分纤芯结构。使用此处所揭示的长周期旋转技术，此类光纤的 PMD 在除本示例

所示的 LEAF®光纤的情形中之外也可以被减小。表格 1 中所阐明的是根据本发明在非螺旋态中的 LEAF®光纤的 PMD 的比较，螺旋态具有 1.5 米的低旋转周期和较长的旋转周期（20 米）。较短周期旋转的旋转幅度约为 3.5 转/米，对于长周期旋转，旋转幅度约为 2.7 转/米。PMD 值的单位是  $\text{ps}/\text{km}^{1/2}$ 。如表格 1 所示，使用此处所揭示的长周期旋转技术，平均的 PMD 值可维持在  $0.01 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ （相比之下，同样的光纤使用短周期旋转技术得到的是小于  $0.02 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ ）以下，更佳地是在  $0.007 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$  以下。使用此处所揭示的技术已经在这样的 LEAF®光纤上实现了低于  $0.005 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$  的 PMD 值。

表格 1

	非螺旋	短周期	长周期
平均的 PMD	0.0302	0.0197	0.0063
中值的 PMD	0.0268	0.0184	0.0064
标准 Dev.	0.0195	0.0102	0.0023
N	16	10	13

在拉制光纤之后，某个一千米的样本被收集在直径为 30 厘米的测量线轴上，并使其缠绕张力为零。选择较大的直径和较低的缠绕张力是为了减小导致光纤双折射或 PMD 以及外部扰动的弯曲度。使用由模式为 HP8509 的 Hewlett Packard 所制造的检偏器来进一步测量微分群延迟（DGD），该检偏器基于被称为 Jones Matrix 本征分析的机械装置以获得待测光纤的 DGD 和 PMD 值。表格 2 阐明了根据本发明针对标准低周期旋转技术对长周期旋转技术这样的情形中的 PMD 减小因子。如表格 1 和 2 所示，根据本发明所用的长周期旋转技术在这种 NZDSF 光纤产品上显著地实现了更佳的 PMD 减小。就发明者所知，这是第一次做到在此类 NZDSF 光纤产品上的 PMD，其中螺旋光纤 PMD 已降低到小于  $0.01 \text{ ps}/\text{km}^{1/2}$ ，而该 NZDSF 光纤产品使用具有  $\Delta 1$ 、 $\Delta 2$  和  $\Delta 3$  三部分且满足  $\Delta 1 > \Delta 3 > \Delta 2$  的分段纤芯折射率剖面。

表格 2

	短周期	长周期
平均的 PMDRF	0.8824	0.2296
中值	0.6182	0.2206

---

标准 Dev.	0.6581	0.2505
N	28	36

对于本领域的技术人员而言，很明显可以对本发明作出各种修改和变化而不背离本发明的精神和范围。因此本发明旨在覆盖这些修改和变化，只要它们落在所附的权利要求书及其等价方案的范围内。

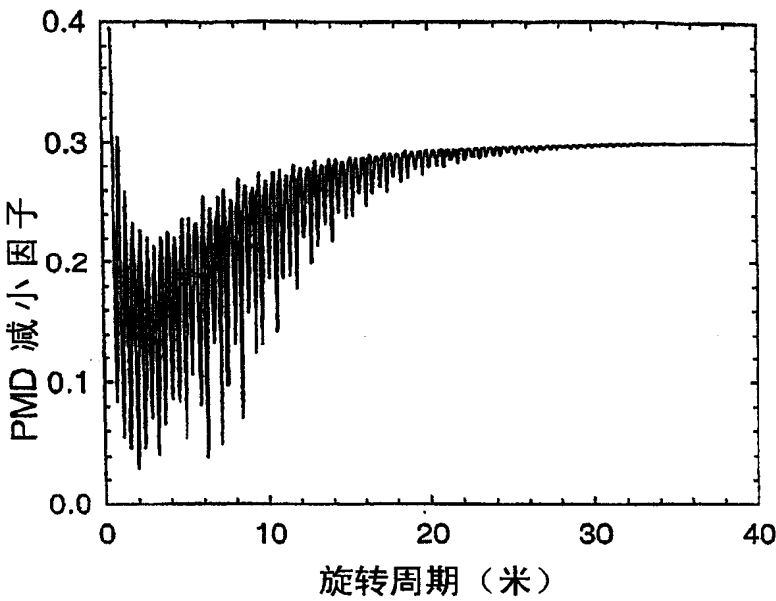


图 1

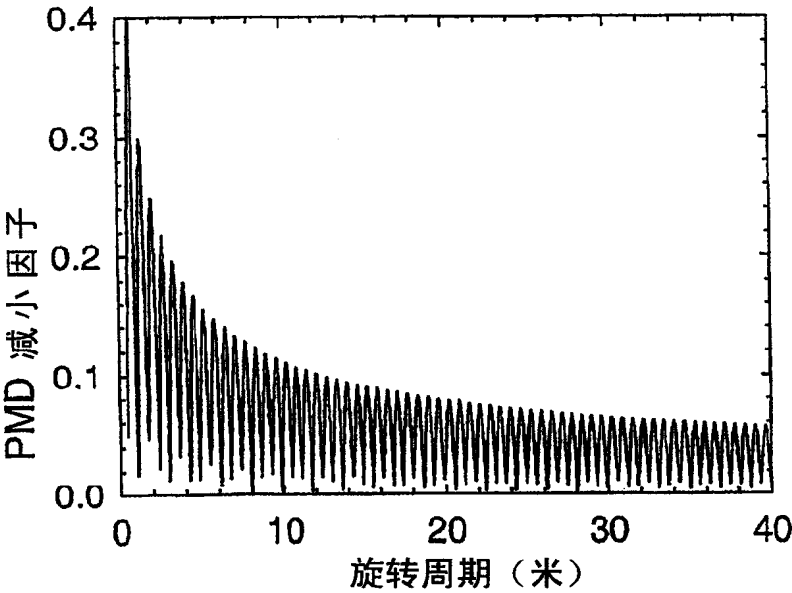


图 2



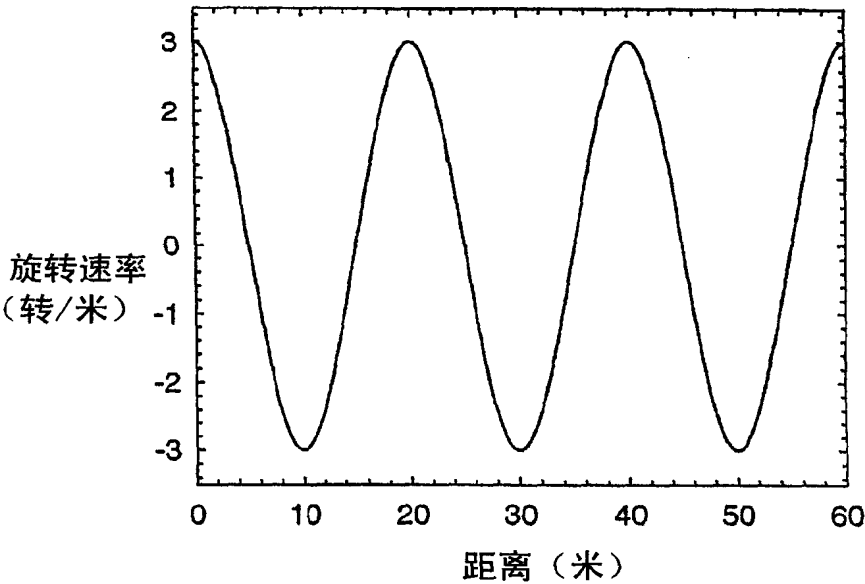


图 3

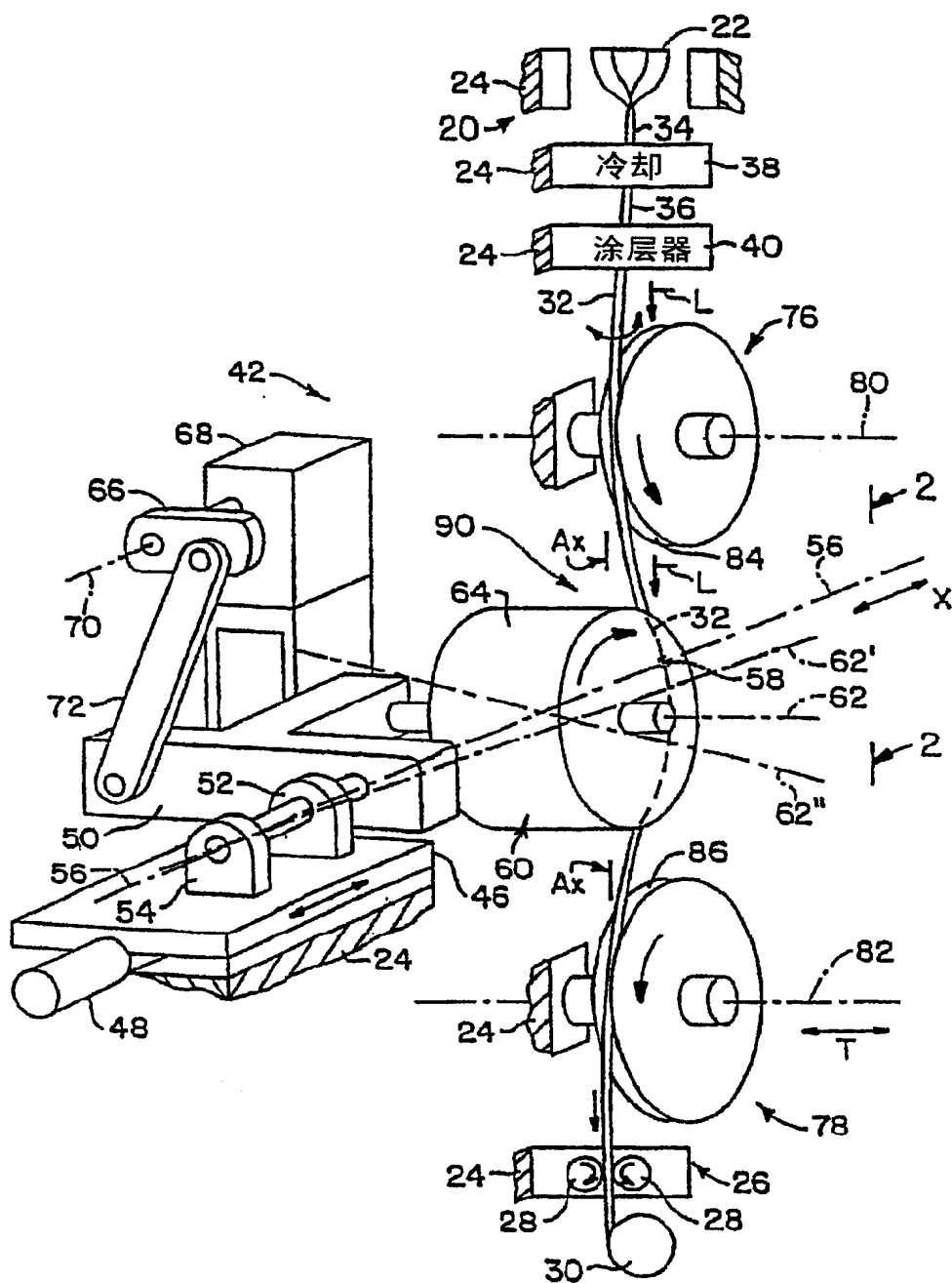


图 4

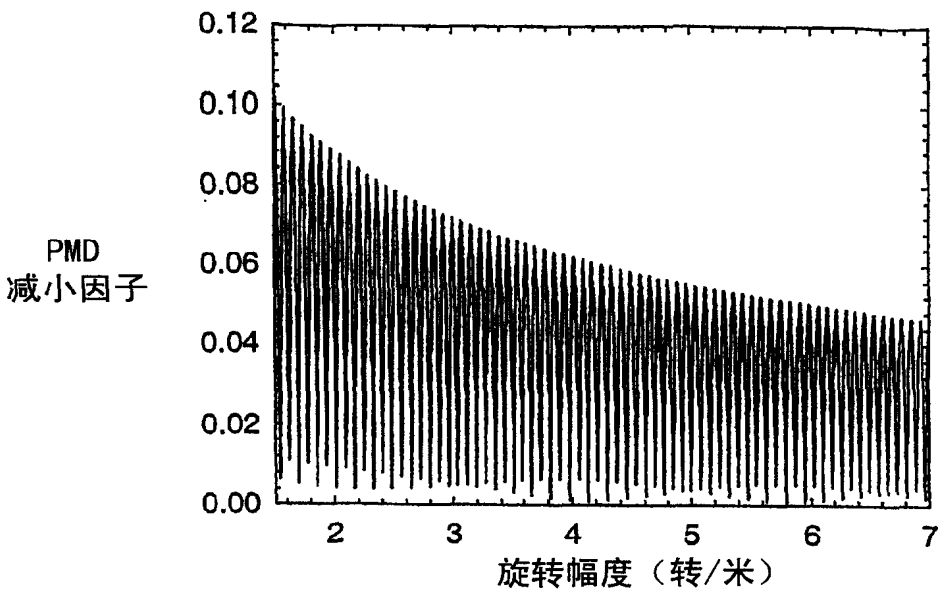


图 5

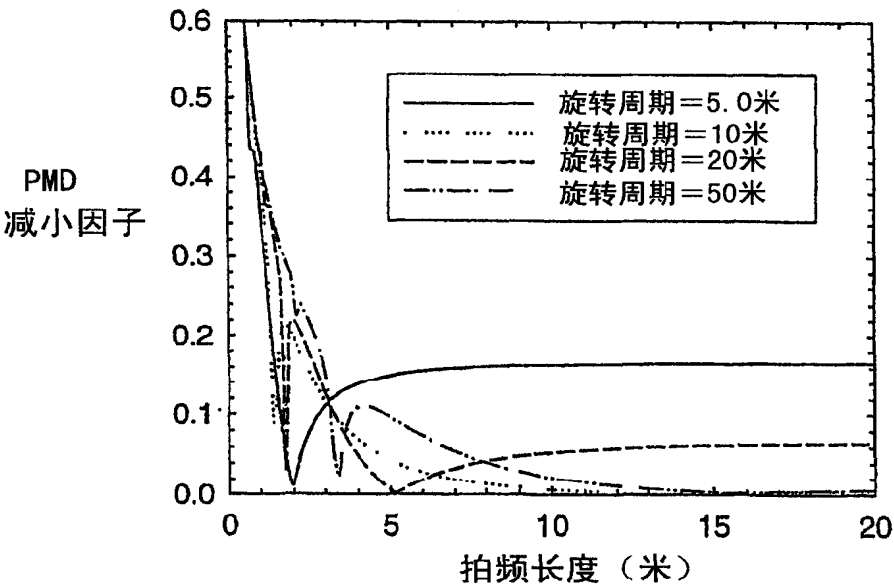


图 6

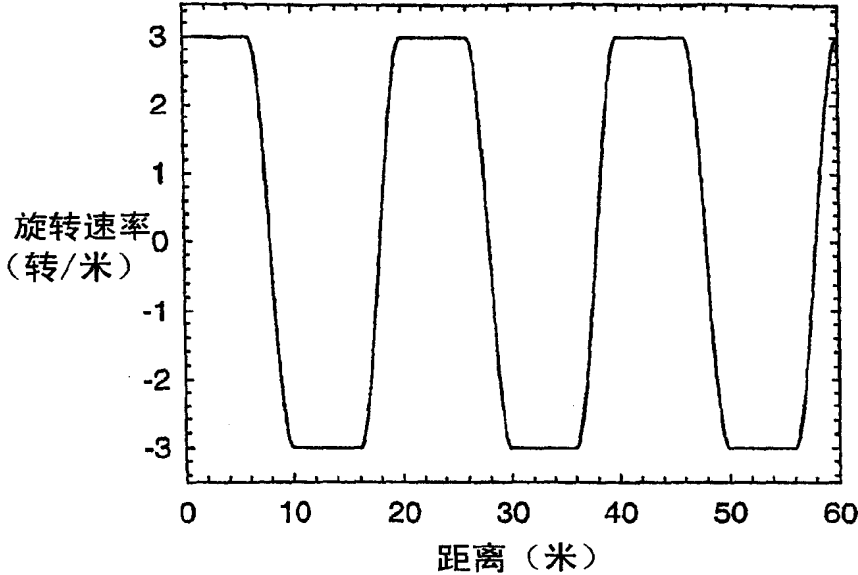


图 7

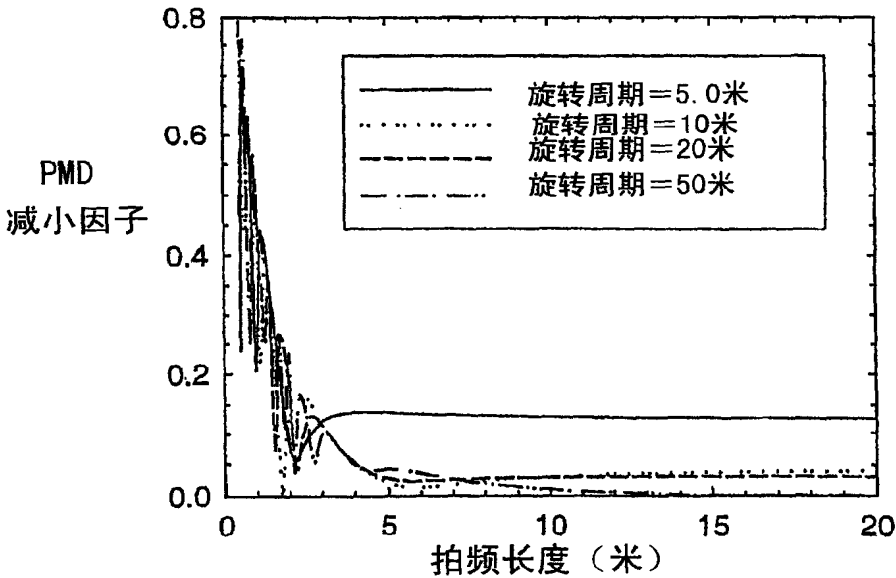


图 8

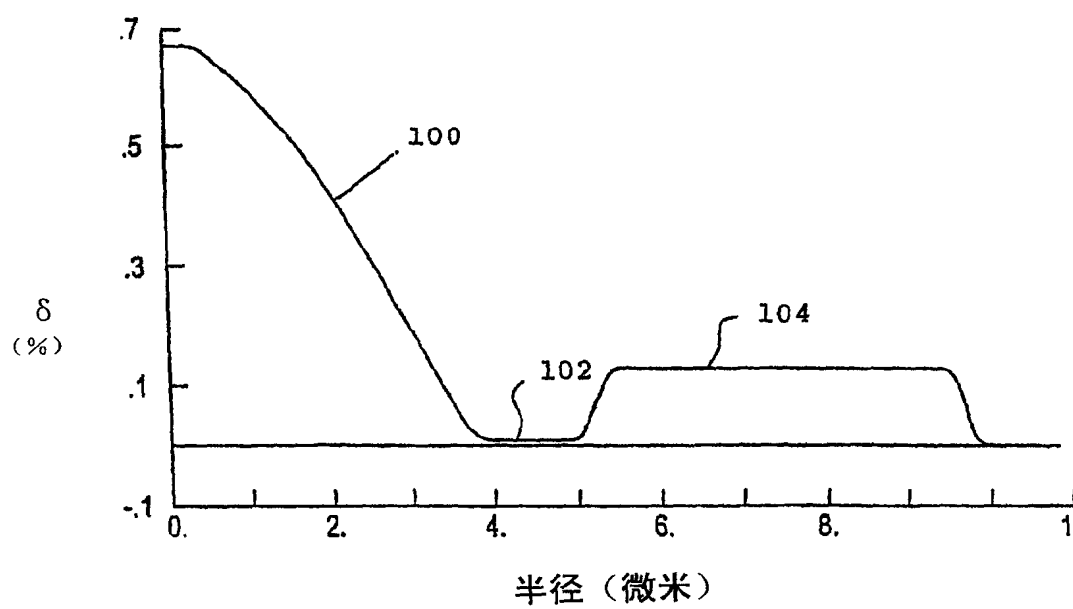


图 9